

**Пчелин В.А., Корчагин И.П., Трегубов В.Б.,
Калита Д.В.**

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Малогабаритные СВЧ усилители мощности S-, X-, Ku-диапазонов

Представлен обзор малогабаритных СВЧ усилителей мощности, разработанных в АО «НПП «Исток» им. Шокина» для различных применений. Приведены конструкции усилителей и электрические параметры. Даны рекомендации по проектированию СВЧ усилителей мощности для различных диапазонов частот.

Ключевые слова: усилители мощности, согласующие цепи, СВЧ транзисторы

К СВЧ усилителям мощности (УМ) предъявляются следующие требования: малые габариты, высокий КПД и выходная мощность, работа на высокой частоте с широкой полосой. Этим требованиям, по имеющимся многочисленным публикациям, удовлетворяют МИС. В отечественной промышленности проводятся разработки МИС, однако серийного выпуска пока нет, а импортные труднодоступны из-за ограничительных мер.

Альтернативным решением могут являться малогабаритные УМ с использованием согласующих цепей (СЦ) на сосредоточенных элементах в L- и S- диапазонах и керамики с высокой величиной ϵ в C-, X-, Ku- диапазонах. Для увеличения $R_{вых}$ проводилось суммирование мощности в выходном каскаде большого числа транзисторов с выполнением высоких требований по электрическим параметрам и габаритам УМ. В настоящей работе дан обзор малогабаритных УМ СВЧ, разработанных в АО НПП «Исток» им. Шокина».

В низкочастотных L- и S-диапазонах радикальное сокращение размеров ГИС возможно с применением в согласующих цепях сосредоточенных элементов (СЭ) чип-конденсаторов и МПЛ индуктивностей. При расчёте учитываются элементы монтажа (длины проволочек, индуктивность заземляющих отверстий в плате и пр.), являющихся составной частью СЦ. Методика расчёта таких цепей подробно приведена в работе [1]. Примеры конструкций с использованием в согласующих цепях СЭ представлены на рис. 1, 2, 3. На рис.1 показан 10 ваттный внутрисогласованный транзистор, работающий в диапазоне частот 2,7-3,0 ГГц, на рис. 2 изображён усилительный каскад и УМ в целом (суммирование мощности 8 транзисторов), обеспечивающий мощность 9 Вт на частотах 3,9-4,1 ГГц, на рис.3 показан усилитель для АФАР с $R_{вых}$ 10 Вт S-диапазона (суммирование мощности 16 транзисторов с $R_{вых}$ транзистора 0,8 Вт). Как видно из рисунков, СЦ не больше ширины кристалла, что позволило просуммировать мощность множества транзисторов в заданных размерах корпусов. Характерной особенностью приведенных выше конструкций является практически невозможность подстройки топологии из-за недостатка места на платах, однако, указанная методика обеспечила необходимую точность определения параметров транзисторов, исключаящую подстройку.

Конечно, суммирование мощности такого большого числа транзисторов обусловлено малой величиной $R_{вых}$, выпускаемых (ко времени разработки УМ), отечественных кристаллов. Однако, применяя указанную методику и современные транзисторы можно повысить $R_{вых}$ УМ на порядок.

Как показывает практика, СЦ на сосредоточенных элементах работают до частот 5 ГГц, на более высоких частотах начинают сильно сказываться реактивности монтажа СЭ.

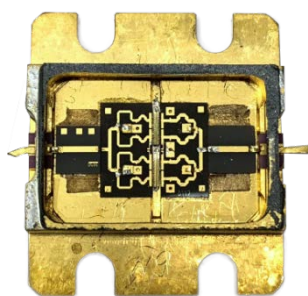


Рис.1. Внешний вид ВСТ S-диапазона

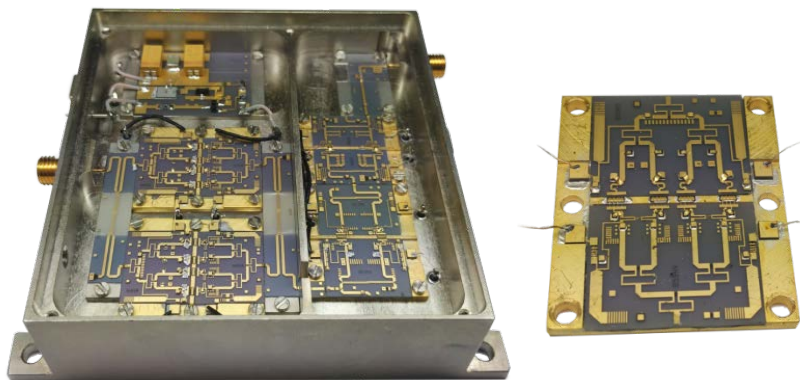


Рис.2. Внешний вид УМ и выходного каскада S-диапазона

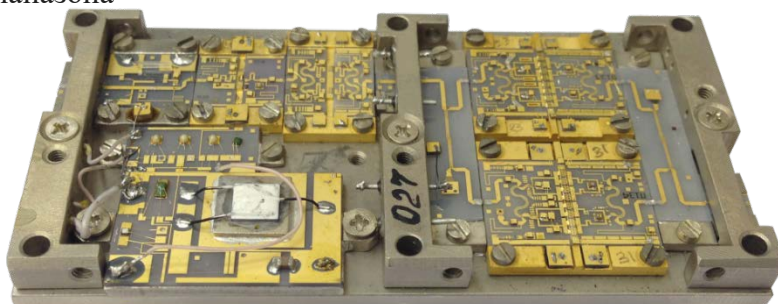


Рис.3. УМ для АФАР S-диапазона

В X- и Ku- диапазонах согласование проводилось с использованием керамики БСТ (барий-самарий-титан) с $\epsilon=80$. Методики согласования и измерений характеристик мощных GaAs СВЧ транзисторов, работающих в режиме большого сигнала, нами опубликованы и апробированы на различных конференциях [3], [4], в том числе и в СПбГЭТУ. Разработанные на нашем предприятии малогабаритные УМ с согласующими цепями, изготовленными на керамике с высокой ϵ , по электрическим параметрам конкурируют с МИС. На рис.4 показаны характеристики УМ и импортной МИС ХР1006 X-диапазона. Следует отметить, что габариты УМ по ширине сравнимы с МИС, по длине больше, примерно, на 30%, что, в ряде случаев, не является критичным.

При суммировании мощности 2-х 8-ваттных транзисторов типа «Принц» была получена $P_{\text{вых}}$ не менее 10-ти Вт в диапазоне частот 9-10 ГГц с выполнением требований по КПД и габаритам для АФАР. Всего было изготовлено более 30 000 субмодулей с $P_{\text{вых}}$ не менее 3 Вт (рис. 5) и 9 500 субмодулей с $P_{\text{вых}}$ не менее 10 Вт (рис 6).

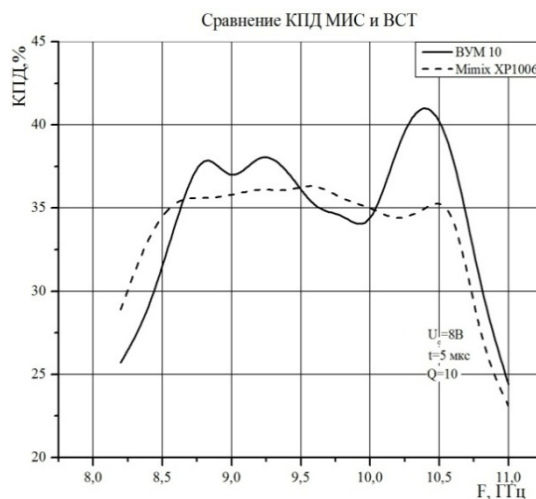
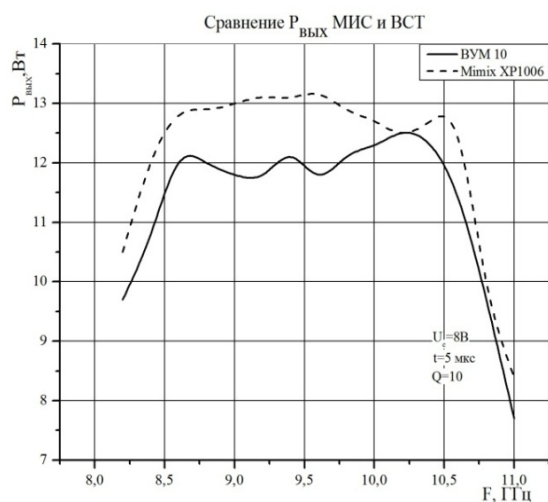


Рис.4. Характеристики МИС и УМ

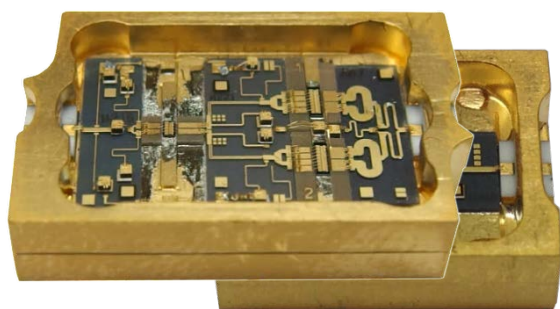


Рис.5. 3 Вт УМ X-диапазона

Рис.6. 10 Вт УМ X-диапазона

В 2016 году успешно выполнена ОКР по созданию малогабаритного УМ X-диапазона, в котором суммировалась мощность 4-х 6-ваттных транзисторов и получена мощность не менее 17 Вт (рис.7).

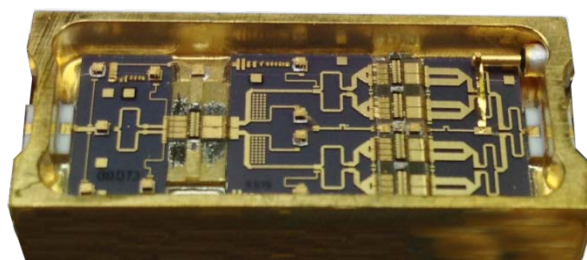


Рис.7. 17-21 Вт УМ X-диапазона

Используя накопленный опыт, был создан 4-х канальный УМ «Канал -УМ» с суммированием мощности 16 транзисторов с выходной мощностью не менее 50 Вт (рис. 8). Потребляемая импульсная мощность составила 9В при токе 36 А.

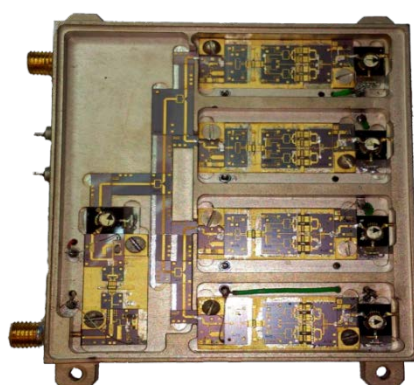
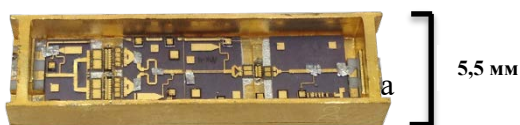
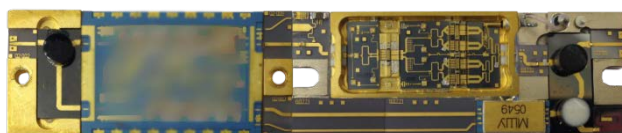


Рис.8. 4-х канальный усилитель «Канал –УМ»

Для УМ Ku-диапазона также применялась СЦ с керамикой $\epsilon=80$. В настоящее время идут поставки УМ с Рвых не менее 9 Вт в диапазоне частот 15,8- 16,1 ГГц, в выходном каскаде которого использовалась керамика с $\epsilon=80$. В прошлом году завершена разработка миниатюрного УМ с шириной корпуса не более 5,5мм. Внешний вид такого УМ, обеспечивающего мощность не менее 6 Вт в диапазоне частот 13,5-14,5 ГГц показан на рис.9.



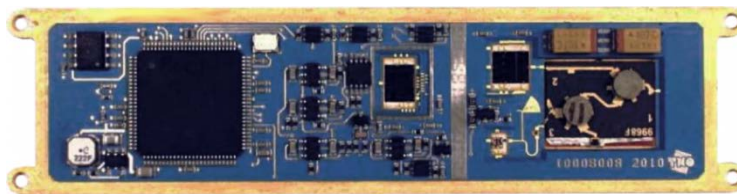
На рис. 10 показано сравнение модулей по Рвых и габаритам, разработанных нашим предприятием и зарубежными аналогами.



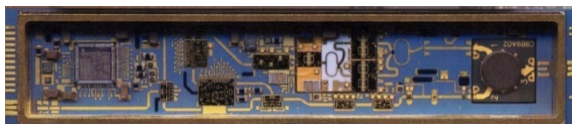
Модуль X-диапазона с Рвых 15 Вт, габариты 17x85 мм



Модуль X-диапазона с Рвых 10 Вт, габариты 16,7x70 мм



Модуль TNO (Нидерланды) с Рвых 8 Вт, габариты 25x110 мм



Модуль Cassidian (Германия) с Рвых 8Вт, габариты 16x70 мм

Рис. 10. Сравнение модулей X-диапазона по Рвых и габаритам

В перспективе улучшение параметров УМ возможно с использованием высоковольтных GaN транзисторов. Последние публикации сообщают о создании ВСТ с Рвых =300 Вт фирмой Sumitomo в диапазоне частот 8,5 – 10 ГГц и усилителя фирмы TriQuint (Qorvo) УМ TGM2635-CP в диапазоне частот 7, 9 ГГц с Рвых 100 Вт на GaN транзисторах.

Заключение

Представлены малогабаритные УМ, предназначенные для работы в выходных каналах АФАР и спец. аппаратуры. В УМ была применена СВЧ элементная база производства АО «НПП «Исток» имени Шокина». Полученные параметры соответствуют современному мировому уровню для изделий с использованием низковольтных GaAs активных элементов.

Библиографический список

1. Пчелин, В.А. Расчетно-экспериментальная методика согласования мощного СВЧ транзистора. Электроника и микроэлектроника СВЧ, 5 Всероссийская конференция, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ, 29 мая-1 июня 2016, с. 234-237
2. Пчелин, В.А., Малогабаритный усилитель с выходной мощностью 6 Вт Ku-диапазона длин волн, Пчелин В.А., Лисицын А.А., Трегубов В.Б., Корчагин И.П., Манченко Л.В., Электроника и микроэлектроника СВЧ, 6 Всероссийская конференция, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ, 29 мая-1 июня 2017, с. 232-235
3. Пчелин, В.А., Коррекция нелинейных моделей мощных полевых транзисторов по их измерением в тестовой плате, Капралова А.А., Корчагин И.П., Манченко Л.В., Пашковский А.Б., Пчелин В.А., Трегубов В.Б., 21-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2011), Севастополь, 12-16 сентября, Материалы конференции, с. 169-170, 2006г.